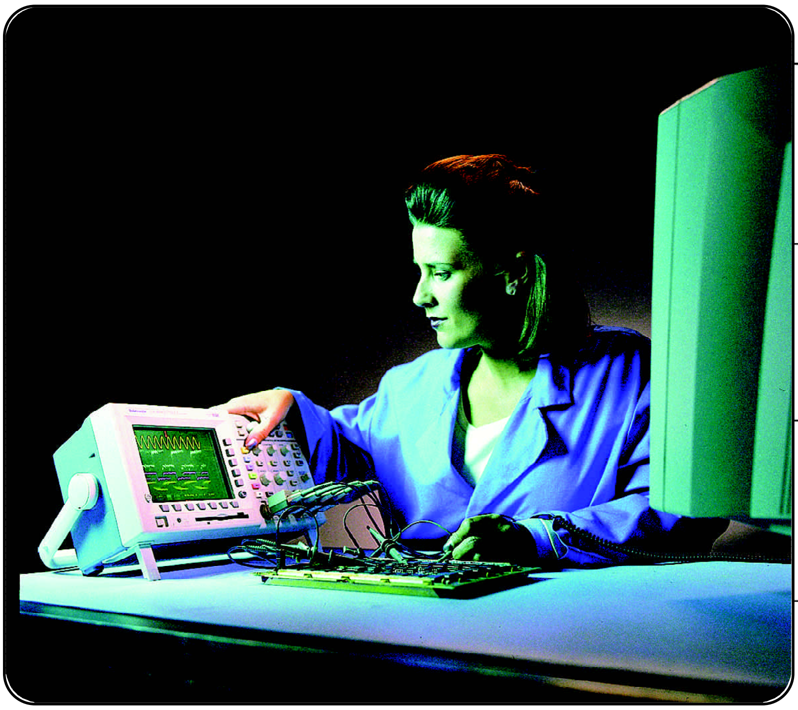
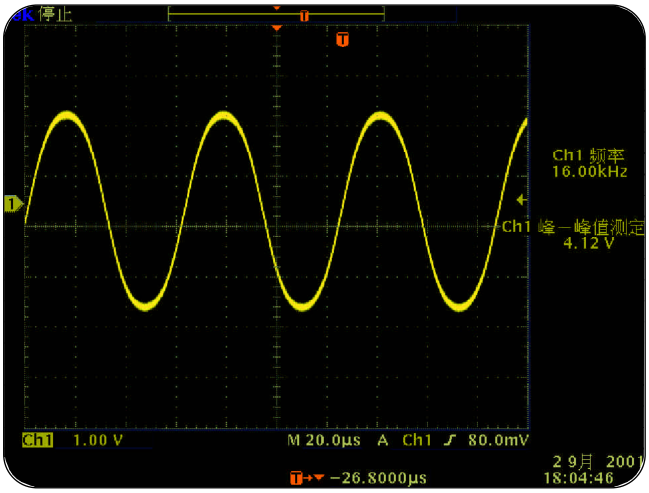
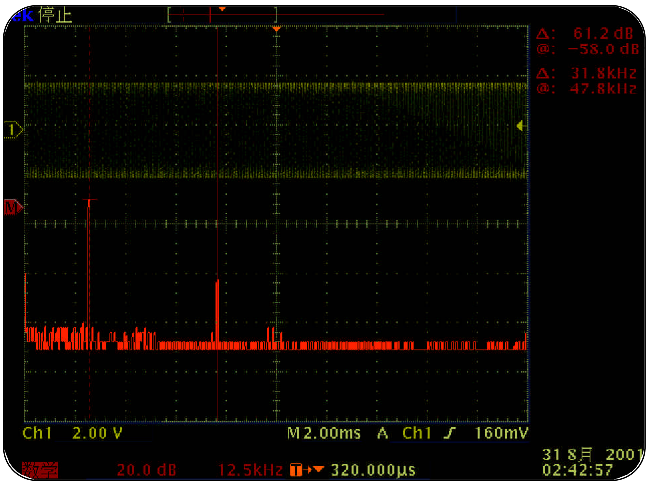
使用 TDS 3000 系列数字荧光示波器观察波形的频率成分



检查波形的频率成分能够揭示出在普通的示波器图形中难以察觉的重要信息。例如，在标准的波形图上（图1）可能看不出波形的失真或对称性方面的问题。但是只要看一下波形的频率成分（图2）那些问题就很明显了。



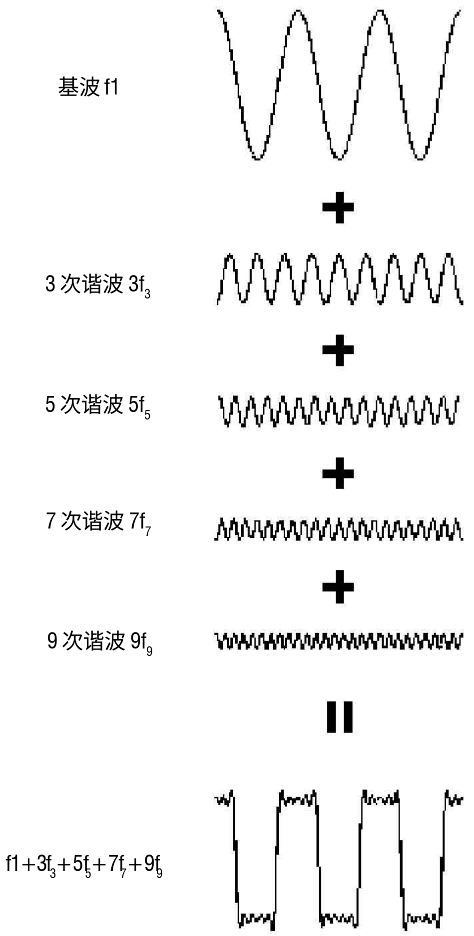
► **图1.** *图中的正弦波在普通的示波器画面上看来正常，实际上却波形失真。在图2所示的TDS 300系列FFT画面上，这种失真就很明显了。*



► **图2.** *用TDS 3000系列示波器显示在图1上看来正常的正弦波，可以看出有失真存在。失真的表现就在于，除了正弦波的基波之外，还出现了谐波。图中的测量游标已设定在基波(2兆赫兹)上。注意其三次谐波频率为6兆赫兹。*

在过去，观察波形的频率成分需要有频谱分析仪，还要掌握仪器的使用技能。现在，对于深入的频率分析依然需要这样。但是，很多基本的频率分析可以用泰克公司TDS 3000这样的数字荧光示波器（DPO）来做。

Tektronix®
Enabling Innovation



▶ ***图3.** 所有的周期性波形都是由一个基本正弦波和特定的谐波相加而成。在本例中，基波和三次、五次、七次和九次谐波相加以求得到一个方波。为了更接近方波，需要加入更高次的谐波。*

为了能够观察波形的频率成分，泰克TDS 3000系列具有模块化的FFT（傅立叶变换）能力。FFT实际上显示的是波形的频率成分。这本应用笔记将介绍TDS 3000系列FFT频率图的基本知识，频率图的含义和使用方法。

波形的基本构成

要了解FFT频率图，就要首先了解波形及其基本构成。波形又区分为周期性波形和非周期性波形。为了简单起见，我们先从周期性波形开始。

周期性波形基础。周期性波形是按照一定的时间间隔或周期多次重复出现的波形。正弦波、方波和三角波都是常见的周期性波形。

按照傅立叶的理论，所有的周期性波形都是由一组特定的正弦波组成的。其中的基本正弦波也叫基波，其频率与该波形的频率相同。例如，1千赫兹方波的基本正弦波的频率也是1千赫兹。同样，1千赫兹三角波的基本正弦波的频率也是1千赫兹。从本质上说，基波是波形中最重要的频率成分，它决定了波形的频率或重复周期。

在所有的非正弦周期性波形中，与基本成分同时存在的还有谐波。谐波是频率为基波频率整倍数的正弦波。例如，1千赫兹方波的三次谐波是3千赫兹的正弦波，而五次谐波为5千赫兹的正弦波，依此类推直至无限。

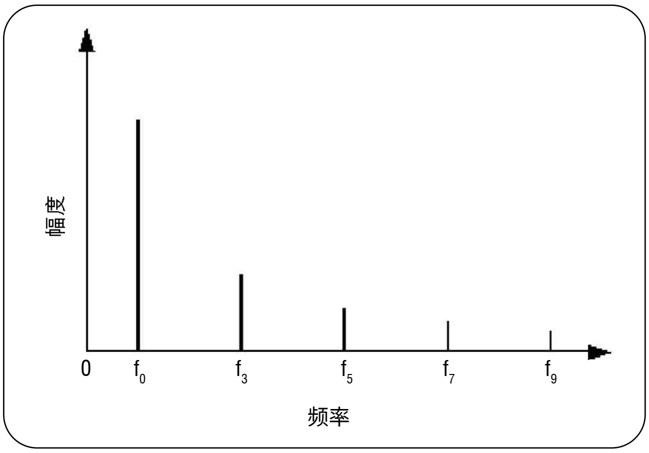
除了具有特定的频率之外,周期性波形的基波和谐波还具有特定的振幅和相位关系。通过这些关系将基波和谐波叠加在一起，就形成了特定的波形。这一点在图3中有进一步的说明,图中显示了一个方波的前五个频率成分相加在一起。

注意，图3中合成的波形并不是一个准确的方波。这是由于所加入的谐波还不够多。若再加入更高次的谐波，所得波形的过渡会更陡峭，波角更直，波顶和波底则更平坦。

从理论上说，需要所有的谐波（直到无限次）才能形成一个理想的方波或者任何其他的非正弦波形。但实际上一切波形的带宽都是有限的，也就是说，高频成分的衰减非常明显。

通常，波形的主要频率成分是用频谱线来描述的。图4描绘的是一个方波的频谱图。图中的频率成分用垂直线条来表示，每个成分都位于频率轴上各自的频率坐标处。每条频谱线的长度代表了该频率成分与其他成分的相对振幅。

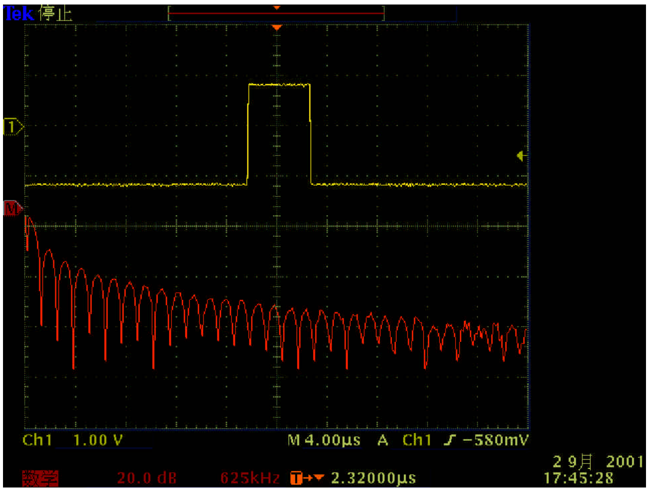
大多数频率分析方法的基本目的都是为了得到如图4那样的频谱图。为此可以使用各种各样的方法。频谱分析仪是用扫频滤波器检测波形中的各个频率成分。如果使用数字存储示波器，如泰克的TDS 300系列，通过其内置的快速富利叶变换 (FFT) 程序对波形进行数字分析，即可得到频谱图。



▶ ***图4.*** *频谱图用垂直线条代表波形的频率成分，频谱线的水平位置则代表该成分的频率，而频谱线条的长度代表该成分的相对振幅。*

非周期性波形基础。非周期性波形不重复自身。与周期性波形不同的是，它们没有一定的重复间隔（周期）。

图5上所示的单脉冲就是非周期性波形的一个例子。由于它仅只是一个脉冲，故没有重复自身。所以，单脉冲没有周期，属于非周期性波形。



▶ ***图5.*** *单脉冲（上）是非周期性波形。这个脉冲是用TDS 3000系列的FFT功能，在单获取方式下捕获的。这种单事件波形的FFT图显示出连续波谱，而周期性波形却是分立的频率线条。*

图5下面的图形是单脉冲的FFT图。请注意，该图并不是一些单个的频谱线条，而是频率振幅的一个连续体，或者称之为包迹。这种连续的频谱和单事件（瞬态）波形的特点完全不同。瞬态信号含有全部的频率而不仅仅是谐波，频谱振幅也有规律性的变化。对于方波，频率振幅是按照(sin x)/x的包迹而变化的。其他的脉冲波形具有另外的频谱形状。

静电放电、接触弧和开关瞬态都是瞬态波形的例子。这些富含频率的波形的出现常常会造成对其他系统的干扰。一个常见的例子是，远方的雷雨可以对收音机和电视机产生天电干扰。另一个例子是，当给机器（如空调机）加电或断电时，在电源线上会出现尖脉冲和其他干扰。

瞬态虽然是非周期性波形的常见例子，但不是唯一的例子。与单个的、短暂的瞬态脉冲相反，非周期性波形也可以是连续的。

数据流、机械振动波和随机噪音都是非周期性波形的典型例子。像单事件瞬态一样，这样的波形是用单触发来获取和存储的。单触发获取可以为待测波形提供稳定的瞬态视图。如果用泰克TDS 300系列的仪器，在分析时就可以用FFT图来检查波形的频率成分。

如何得到 FFT 图

泰克TDS 3000系列数字存储示波器用混合基FFT程序分析波形的频率成分。混合基FFT的好处是能给出以10为底的记录长度作为结果。这样，频率标度就能与以10为底的DSO时标控制的1-2-5序列直接匹配。与比较常见的二进制FFT记录长度相比，这种方法更容易对频率结果作出解释。

用TDS 3000系列获得FFT图的步骤如下：

步骤1．用标准的TDS 3000系列获取并显示波形

步骤3．在Math菜单上选择FFT函数和所用的通道

完成上述步骤即可得到所需波形的FFT图。FFT图的标度位于屏幕底部和MATH图标的右面。水平标度（频率）为赫兹/分度，图的左边缘处为0赫兹。垂直标度（相对振幅）为dBVRMS，即相对于1 VRMS的分贝值（0 dB = 1 VRMS)。TDS 300系列的测量游标系统能够方便快捷地对波形进行精密的测量，这是在FFT图中能够采用如此精密的分度的先决条件。

下面的几个条目是对于TDS 3000系列FFT及其频谱图的进一步的阐述：

信号获取：FFT功能适用于以单触发方式（非周期性信号）或反复触发方式（周期性信号）所获取的信号。在获取周期性信号时，应使用Signal Averaging功能以降低信号噪音。建议平均数不小于16。

汉宁窗（余弦平方窗）：对获取的信号进行FFT分析之前，要用汉宁窗将其放大。有关汉宁窗及其应用的详情，可参见TDS 3000系列用户手册。为了在脉冲型波形上得到最佳结果，在获取脉冲时要使用触发定位，这样其峰值就可以位于TDS 3000系列显示器的水平中心位置，如图5所示。

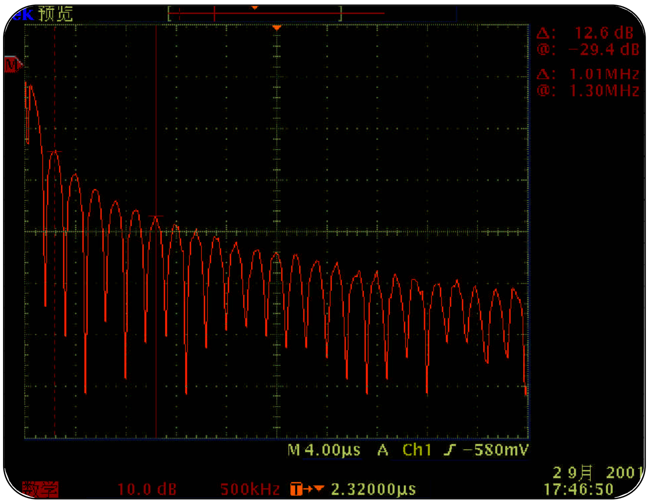
频率分辨率： 在显示出的FFT结果中有1000个频率点。这些点在0赫兹与频谱图右侧的奈奎斯特频率（FN）之间均匀分布。奈奎斯特频率等于捕获该波形时所用的采样率的一半。即，若Fit to Screen 设为on，则FN=1/2 * 100/(时间标度设置)；若Fit to Screen 设为off，则FN=1/2 * 50/(时间标度设置)

确定波形的频率成分

TDS 300系列FFT图最基本的用途就是给出周期性波形的频率成分。这项工作有时也叫谐波分析，因为周期性波形的频率成分与谐波密切相关。

获取任何一个周期性波形并对其施以FFT分析，即可得到该波形的频率成分。用TDS 300系列的测量游标功能则可对频率成分作进一步的分析。只要把游标置于感兴趣的频率成分上，即可读出相应的频率和振幅的数值。

可以用同样的方法分析非周期性波形。但要记住，瞬态脉冲具有连续的频谱而非分立的谐波。对这样的连续频谱，通常要集中分析3分贝宽的主波瓣和旁瓣的相对振幅（见图6)。



▶ *图6. 用游标分析波形的频率成分。图中正在测量前两个旁瓣的振幅差和频率差。*

确定波形失真

TDS 3000系列FFT分析的另一个基本用途就是确定波形失真。这在图1和图2中已有描述。图中给出了“看似正常”的正弦波及相应的频率图。

请注意图1中的正弦波看似正常。但图2的TDS 3000系列FFT分析则在正弦波的频率构成中显示出一些低电平的频率成分。这些低电平成分的出现表明这个正弦波并不纯净，而是有谐波失真。如果正弦波纯净的话，它的频谱就应只有一条频率等于该正弦波频率的频谱线。

真实的正弦波大多数都有一些谐波失真。失真的程度常用某些谐波与正弦波的基波的相对电平来描述。例如，可以说三次谐波失真比基波小50分贝。为了识别和测量不同的谐波及其电平，可以使用TDS 3000系列的FFT功能和测量游标功能（见图2）。

也可以用TDS 3000系列的FFT功能检查波形的对称性。例如，一个顶部和底部都对称的方波应当只含有基波和奇次谐波。如果方波不对称，则会在FFT图中出现偶次谐波。当方波的不对称性增加时，这些偶次谐波的电平也增加。

在用FFT确定谐波时应该多加小心。因为有时显现的谐波成分实际上是高频成分的假信号。图7给出的是一个方波及其FFT图。初看起来，在高频奇次谐波之间好象存在偶次谐波。但实际上并非如此。实际情况是，高频奇次谐波在图中发生了折返，使之貌似偶次谐波。这样解释的理由是，在频谱图的右端（奈奎斯特频率处）谐波并没有减弱到可以忽略不计。结果，那些应从屏幕右侧逸出的高频谐波又折返到屏幕的右边缘，看起来就成了低频的假信号。为了尽量消除这种现象，应当在时间显示中设定较少的周期，然后重新获取这个方波。(有关假信号和其他FFT 特性的详情，请参考FFT：基本原理和概念，Robert W. Ramirez,Simon & Schuster, 1985。)

其他应用

前面的例子所涉及的主要是谐波分析。检查波形的谐波还可以得到该波形的其他信息。

在很多其他的应用中也能用频率图检查周期性和非周期性波形，仅举几例如下：

调幅（AM)。调幅信号的FFT图给出载频和调制边带的相对电平。当用单频测试音调制载波时，这是最明显的。

振动分析。在TDS 3000系列示波器上可以借助传感器将机械振动作为振动波显示出来。这个总的振动信号波是由机械系统内各个零件发出的振动分量组成的。

可以用FFT图观察和分析各个振动分量。例如，信号分析可用于确定系统内滚柱轴承的超量振动。这种分析方法的好处是，在性能不佳的轴承造成更严重的机械损害和停工之前将其检测出来并替换掉。

频率响应。可以用FFT对电路的频率响应特性迅速地做出评估。方法是，在电路的输入端加入一个窄脉冲（冲激），在电路的输出端获取该冲激的响应波形。用这个响应波形的FFT图即可评估电路的频率响应特性。还可以用测量游标对频率响应做进一步的分析，例如分析其带宽、滚降特性和带外响应特性等。

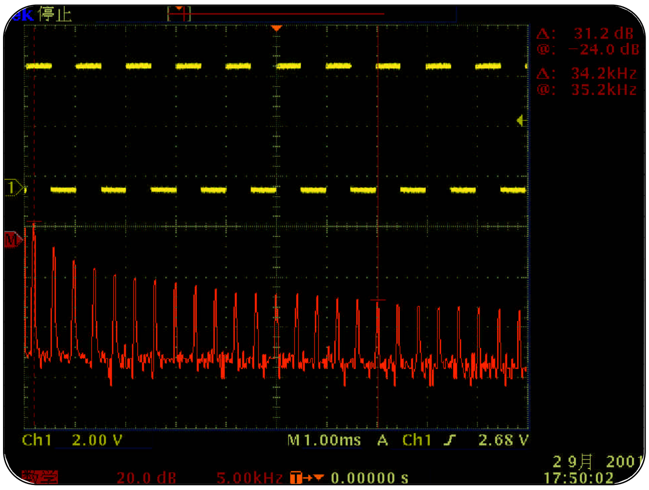
提高频谱图质量的技巧

频谱图的质量取决于很多因素。当然最关键的因素是FFT所要分析的那个波形。其他的因素包括对波形的各种人为影响，如加在波形上的直流成分或偏移，以及噪音等。获取波形的方法也会对频谱图产生影响。

下面介绍的方法可以解决提高频谱质量方面的一些主要问题：

- 去除直流成分。有些波形含有直流成分或偏移。在频率图中，较大的直流成分可以掩盖其他频率成分。为了使直流成分减至最小，应当通过交流耦合来获取波形。
- 即便采用了交流耦合，波形仍可能含有残留的少量直流成分。这是由于捕获的波形周期数不是整数（例如4.5个周期，而非4个周期）。最简单的办法就是将少量的残余直流成分忽略不计。另一个办法是获取更多的波形周期以减少在边缘处的不完整周期所占的百分比。
- 获取更多的波形。对于周期性波形来说，在时间图上获取较多的周期可导致在频率图上更大的频率分辨率（见图2）。一般来说，如果在时间图上最少出现4到8个波形周期，则全频率图是最好用的。
- 在处理脉冲或瞬态波形时，要保证整个脉冲（包括脉冲前后的一些基线）都出现在屏幕上。为了使频率图有最佳效果，整个脉冲应覆盖时间轴的1/8到 1/4，而且应位于画面中心。

应当小心的是，如果在靠近频率图的右边缘出现了一些高频成分，则可能产生假信号（见图7）。当超出了显示边界的高频成分折返回来作为低频成分显示在画面上的时候，就成为假信号。如果假信号的出现成了问题，那么在获取波形时应使之在时间轴上更加展开。对于周期性波形，这意味着获取较少的周期。对于瞬态波形，则意味着将脉冲在时间轴上展开得更多一些。用户只需有一些经验就能判断如何获取信号才能到最好的FFT图。



▶ ***图7.*** *高频成分看似低频成分 – 假信号或折返现象。当FFT图在画面右侧没有减少到0时，其残存部分折返到画面上形成假信号。*

- 信号平均法。被捕获的波形上的噪音在频率图上也会表现为噪音。如果是周期性信号上的随机噪音，则采用信号平均法可以减少获取信号上的噪音幅度。平均数越大，时间图和频率图上噪音的减少也越大。

使用信号平均法获取周期性波形时，可在TDS 3000 系列的 Acquire 菜单上选择Average。建议平均数不小于16。这样即可以为一般的周期性信号提供清晰的时间图和频率图。如果捕获的噪音信号比较强，就需要选择更高的平均数，更多地减少噪音。

最后要说明的是，信号平均法只能用于周期性波形。这是由于为了生成一个平均的波形必须多次获取该波形。而非周期性波形在单触发方式下只能获取一次，不能求取平均。

结论

观察波形频率成分的技能为你开辟了认识该波形的新天地。过去，要想得到频谱图就必须使用频谱分析仪或者实验室专用的具有FFT功能的高质量DSO(数字存储示波器)。但是现在不用了。

现在有了泰克的TDS 3000 系列数字存储示波器，在工作现场就可以实现基本的FFT 功能。你能够观察波形的频谱图。这种示波器能迅速确定波形的频率构成和频谱的形态，是研究工作和分析工作中得心应手的工具。它能够检验电路的响应特性、测试波形的失真、识别和追踪噪音和干扰问题，是极好的调试设备。

使用 TDS3000 观测信号的频率成分

▶ 应用指南

泰克一直在全方位地、持之以恒地收集应用注释、技术简介和其它资源，以帮助工程师开发尖端技术。

如需进一步信息

请访问 **www.tektronix.com** 网站上的 “ **Resources For You** ”。

泰克科技(中国)有限公司

泰克北京办事处
北京市海淀区花园路4号
通恒大厦1楼101室
邮编：100088
电话：(86 10) 6235 1210/1230
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市静安区延安中路841号
东方海外大厦18楼
邮编：200040
电话：(86 21) 6289 6908
传真：(86 21) 6289 7267

泰克广州办事处
广州市环市东路403号
广州国际电子大厦2807A室
邮编: 510095
电话：(86 20) 8732 2008
传真：(86 20) 8732 2108

泰克深圳办事处
深圳市罗湖区深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦G1-02室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
传真：(86 755) 8246 1539

泰克成都办事处
成都市人民南路一段86号
城市之心23层D-F座
邮编：610016
电话：(86 28) 8620 3028
传真：(86 28) 8620 3038

泰克西安办事处
西安市东大街
西安凯悦(阿房宫)饭店322室
邮编：710001
电话：(86 29) 8723 1794
传真：(86 29) 8721 8549

泰克香港办事处
香港铜锣湾希慎道33号
利园3501室
电话：(852) 2585 6688
传真：(852) 2598 6260

ISO 9001

© 美国泰克公司(Tektronix, Inc.)2001年版权所有。全权所有。泰克公司的产品受正在申请或已批准的美国和外国专利保护。本手册之内容取代以前所有出版物的内容。本公司保留随时更改技术规格和产品价格的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是本公司的注册商标，本文述及之所有其它商业名称分别为其各自公司的服务标志、商标或注册商标。

Tektronix®
Enabling Innovation